EMC Characteristics of the Refrigerant Pipe-Based Transmission System

Toshiyasu Higuma, Non-member, Yousuke Watanabe, Student Member, Masamitsu Tokuda, Member

Keywords : refrigerant pipe, HF-band PLC, the moment method, LCL, radiated electric field

The low power ad-hoc RF wireless network covers the communication of appliances and sensors equipped in each room of building and home. But, some kinds of walls prevent the penetration of the wireless communication signal into the other room. We have proposed the refrigerant pipe-based transmission system, which uses refrigerant pipe of the multi air-conditioner (Fig.1). The refrigerant pipe-based transmission system expands the communication into the whole building.

The cross sectional view of a pair of refrigerant pipes is shown in Fig.2. A polyurethane-foam is wrapped around the copper-pipe concentrically as shown in Fig.2 and the refrigerant pipes are similar to the insulated wires. Therefore, a pair of refrigerant pipes can be considered as the parallel transmission-lines for the general PLC modem.

However a pair of refrigerant pipes cannot be used to transmit signals in normal ways because they are electrically shorted at both terminals. Therefore, impedance upper such as ferrite core are covered near the both terminals to convert a pair of pipes into the insulated pair of electrical wires as shown in Fig.3.

In this paper describes EMC characteristics of the pipe-based transmission line, such as LCL (Longitudinal Conversion Loss) and leaked electric field.

A calculation and measurement results of LCL are shown in Fig.4, and they agree with each other nearly. There are peaks resonance in over 10MHz in frequency characteristics, which are created by short-terminate branch pipe. Fig.5 shows calculation results of the radiated electric field from the real scale pipe-based transmission line model. The electric field in vertical/horizontal polarization is under the EMI regulation in Japan.

The EMC characteristics of the pipe-based transmission line are

Fig. 1. Multi-type air-conditioner system

Fig. 2. Cross sectional view of refrigerant pipes

calculated by using the method of moment, and it is indicative that the calculation values of the EMC characteristics almost agreed with measurement values. Furthermore, it is suggested by computer simulation of the real scale model that the pipe based transmission system has possibility to comply with the EMI regulation specified by the electrical appliance and material safety law in Japan.

Fig. 3. Fundamental construction of pipe-based transmission

Fig. 4. Calculation result of LCL (branch condition short)

Fig. 5. Calculation result of leaked electric field in the maximum model

空調金属配管を伝送媒体に用いた伝送システムの EMC 特性

非会員 樋熊 利康* 学生員 渡邊 陽介**
正員 徳田 正満**

EMC Characteristics of the Refrigerant Pipe -Based Transmission System

Toshiyasu Higuma*, Non-member, Yousuke Watanabe**, Student Member, Masamitsu Tokuda**, Member

We have proposed the pipe-based transmission system, which uses refrigerant pipe of the multi air-conditioner, and can expand the wireless communication system confined within a room space into the communication system applicable to the whole building. In this paper, EMC characteristics of the Refrigerant pipe-based transmission line, such as LCL (Longitudinal Conversion Loss) and leaked electric field, are calculated by using the method of moment, and it is clear that the calculation values of the EMC characteristics almost agreed with measurement values. Furthermore, it is suggested by computer simulation of the real scale model that the pipe based transmission system has possibility to comply with the EMI regulation specified by the electrical appliance and material safety law in Japan.

キーワード : 空調金属配管, 高周波帯 PLC, モーメント法, 平衡度, 漏洩電界

Keywords : refrigerant pipe, HF-band PLC, the moment method, LCL, radiated electric field

1. はじめに

新規配線の不要なネットワークは、施工性、経済性の面で既築の家屋やビルなどへの管理システムに導入するのに有効である。IEEE802.11b/g や IEEE802.15.4 など無線媒体を用いるのも有効であるが、家屋全体、ビル全体を無線のみでカバーすることは、間仕切壁や床、天井など構造物による電波の減衰により困難である。その解決手段として、筆者等はビル用マルチエアコンの冷媒配管を無線の補完手段として用いることを検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。図 1 に示すように、冷媒配管は屋外に配置される室外ユニットから屋内の各部屋に設置される室内ユニットに液管とガス管がペアで敷設されている。また、その断面構造を図 2 に示すが、銅パイプの周囲を発泡ウレタン等の絶縁体で覆った構造であり、絶縁電線と同一の構造とみなせる。一般的なペア線との違いは①空調ユニットとの接続部において対を構成する 2 本の冷媒配管は電氣的に短絡されている、②両配管に流れる冷媒の様態が異なるため、配管径が異なり、線径が異なる導体のペア線構造となっている、の 2 点である。

2006 年 10 月に、家庭内の電灯線を情報伝送媒体として用

い、高速ネットワークを実現する高周波帯電力線搬送通信 (HF-PLC: High Frequency – Power Line Communication) 技術が法制化され、実用化された。2MHz から 30MHz の HF (High Frequency : 短波) 帯高周波信号を用いる新しい通信技術である⁽³⁾。EMC 対策に用いられるフェライトコアはこの帯域で数十オームから数百オームのインピーダンスを持つ。このフェライトコアを用い、HF-PLC 信号周波数帯域において冷媒配管の対を電氣的に分離し、ペア線として利用可能とする配管伝送システムを筆者等が考案した。

この伝送媒体を無線と組み合わせることにより、ビル全体をカバーする新規配線工事不要のネットワークを構築することが可能である。ただし線径の異なるペア線構造のため、伝送線路として、平衡度や漏洩電界について十分に検

図 1 マルチタイプエアコンと冷媒配管

Fig. 1. Multi-type air-conditioner system

* 三菱電機 (株) 住環境研究開発センター
〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1
Mitsubishi Electric Corp. Living Environment Systems Lab.,
5-1-1 Ofuna Kamakura, Kanagawa 247-8501

** 武蔵工業大学大学院工学研究科
〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1
Musashi Institute of Technology.,
1-28-1 Setagaya-ku, Tokyo 158-8557

図 2 冷媒配管の断面構造例

Fig. 2. Cross sectional view of refrigerant pipes

図 3 配管伝送システムの原理図

Fig. 3. Fundamental construction of pipe-based transmission

討する必要がある。

本論文では、この新しい伝送媒体に関し、LCL (Longitudinal Conversion Loss: 縦方向変換損)、漏洩電界等の EMC 特性、モーメント法による計算の妥当性検討、ならびにシミュレーションによる電磁環境適合性に関する検討結果について述べる。

2. 配管伝送システムの原理

図 3 に金属配管による伝送システム（以下、配管伝送システム）の原理図を示す。室内ユニットには熱交換器が内蔵されており、配管を介して室外ユニットとの間で冷媒を循環させることにより空調を行う。この熱交換器はアルミ合金などの金属製であり、そこに接続される 2 本の配管は電氣的に短絡されている。また、同様に室外機においても 2 本の配管は冷媒回路の出入口で電氣的に短絡されているため、このままではディファレンシャルモードの伝送はできない。そのため各ユニットの配管接続部にフェライト材等の磁性体を用いたインピーダンスアッパ Z を配し、HF 帯周波数に於いて所定のインピーダンスを確保できるようにしている。インピーダンスアッパには Fair-Rite 社のフェライトコア、型番 0461167281(9)を用いた。このような処理を行うことで空調の冷媒配管は、各分岐端を 2Z で終端した伝送線路と等価となる。

図 4 は評価に用いたインピーダンスアッパの周波数特性である。HF-PLC 帯域において 10~110Ω の周波数に対して右

図 4 インピーダンスアッパの周波数特性

Fig. 4. Frequency characteristic of the impedance adjuster

図 5 実配管の減衰周波数特性計測値 (60m)

Fig. 5. Measurement results of the pipe-based transmission loss in a building (length=60m)

上がりのインピーダンス特性を示している。したがって、インピーダンスアッパを取り付けた冷媒配管は HF 信号帯域に於いて、各ユニット端が 20~220Ω 程度のインピーダンスで終端されたペア線として機能する。

図 5 は実際のビルに設置されている空調システムの配管にインピーダンスアッパを取り付け、室外ユニットと最遠端の室内ユニット間の減衰量周波数特性の計測値である。計測対象の空調システムは室外ユニット 1 台、室内ユニット 8 台で構成され、室外ユニットと最遠端に配置された室内ユニットとの図面上の直線距離は 60m である。計測した周波数範囲は 6 章に記載している Dispersed-Tone Power Line Communication (HF-DTPLC)方式(6)モデムの使用周波数とした。減衰計測はファンクションジェネレータに出力インピーダンス 5Ω のアンプを接続し 1:1 のトランスを介し配管に接続した。各モデムの使用周波数毎に配管への印加電圧レベルを 99dBμV に調整し、受信レベル Vr[dBV]をスペクトラムアナライザを用いて計測し、印加した電圧値から Vr を減算し減衰量とした。計測した減衰量は周波数の 2 乗にほぼ逆比例して小さくなる傾向を示す。配管を覆う断熱材には、一般的に体積発泡率が 30 倍の発泡ポリエチレンが用いられており、誘電体損失は 10MHz で 0.01dB/m 程度で

ある。したがって、配管自体の減衰量は緩い右上がりの傾向を示すが、図 5 に示す様に右下がりの傾向を示した。これはインピーダンスアップが図 4 に示すインピーダンス特性を持つことが要因の 1 つであると推定できる。

このように線路としての信号減衰特性については問題なく利用できる可能性を確認した。一方、対を構成する配管径が異なっているため、線路の平衡度や漏洩電界について検討を加える必要がある。次章では、配管の平衡度を示す LCL と漏洩電界に関して、計測とモーメント法による計算結果の比較を行い、計算方法の妥当性について検討を行う。

LCL、漏洩電界の計算については 4 端子対回路網による方法⁽⁴⁾が検討されているが、評価対象毎にグラウンドとの関係を考慮し、一次定数を求める必要があるため、モデルの作成が煩雑である。一方、モーメント法は計算対象の物理的形状を入力するだけでモデルが作成でき、グラウンド面との関連を含めた計算が可能であるため、物件毎に様々なトポロジーをとる媒体の評価には最適であり、伝送線路として考慮されていない電力線に関しても電界計算などの検証結果が報告されている⁽⁵⁾。これら実績等も勘案して、配管伝送システムへの展開を試みた。

3. 金属配管モデルの計測方法

〈3・1〉 リファレンスモデル モーメント法による LCL 計算の妥当性を評価するために、図 6 に示す線路モデルを作成してリファレンスモデルとした。本モデルは $\phi 6.35\text{mm}$ と $\phi 9.5\text{mm}$ の冷媒配管を用い、長さ 4.4m のメイン配管に、長さ 3.2m の分岐配管を持つ構成とした。分岐配管の端末条件は極端な例として開放、短絡の 2 条件としている。メイン配管の両端は空調ユニットによる短絡と同一条件とするため端末を短絡した上で、インピーダンスアップを取り付け、その配管側に BH Electronics 社製バラン (BH040-0092、帯域幅 1MHz~650MHz) を接続した。空調用配管の屋内での敷設状況は様々であり、金属を含む躯体壁面との距離を特定することは困難であり、実態との整合性の検討など今後の課題である。本検討では計算の可能性検討のため、躯体壁面との距離を 1m と仮定し、また、躯体を GND と見なして、リファレンスモデルの配管とグラウンド面との距離は 1/10 スケールの 10cm とした。図 7 に直線部分のメイン配管と分岐部配管の断面構造を示す。分岐接続部でメイン配管と接触するのを防止するため、 $\phi 9.5\text{mm}$ の冷媒配管を 10mm 高く配置している。

〈3・2〉 LCL の計測方法 LCL の周波数特性は図 8 に示す構成で測定した。送信端に接続したバランの共通モードポートにネットワークアナライザから電圧 VIC を印加し、同バランのディファレンシャルモードポートからの出力電圧 VOD の比をネットワークアナライザで計測することにより配管の LCL を測定した。配管のメイン線路端にもバランを接続し、共通、ディファレンシャルの両ポートには 50 Ω の整合終端器を接続している。また、バランの筐体は直接グラウンドプレーンに接地した。さらに、短絡したメ

図 6 配管のリファレンスモデル

Fig. 6. Construction of the pipe-based transmission line

図 7 配管の断面図

Fig. 7. Cross sectional view of main and brunch pipes

図 8 LCL 計測システムの構成

Fig. 8. Configuration of LCL measurement systems

図 9 漏洩電界の計測モデル

Fig. 9. Pipe-based transmission line model for leaked electric field

図 10 漏洩電界計測システムの構成

Fig. 10. Construction of leaked electric field measurement system

イン配管の両端はグラウンドプレーンに接続している。

HF 帯 PLC の帯域上限は 30MHz であるが、リファレンスモデルが総延長 7.6m と短いため、長い線路での計算結果を模擬的に評価するため、10 倍の周波数である 300MHz まで測定した。測定周波数範囲で計算値の一致が得られれば、リファレンスとしたモデルの 10 倍程度の長さを持つ線路で同様な計算精度が得られていると見なすことができる。

〈3・3〉 漏洩電界の計測方法 5m の配管の両端に空調機の室内ユニットならびに室外ユニットを接続し、モデルを構成した。また、配管の両端には図 4 に示した特性のインピーダンスアッパを取り付けている。計測周波数は計測に用いたバイコンカルアンテナの帯域である 30MHz～300MHz とし、電波無響室内で計測した。アンテナは配管の中央から垂直方向に距離 3m 離して設置し、その高さは 1m とした。配管の高さは配管支持台高の 10cm としている。図 9 に漏洩電界計測に用いたモデルの構成図を、図 10 に計測システム構成を示す。

4. 計測結果

〈4・1〉 LCL 計測結果 図 11 に LCL の計測結果を示す。分岐端が短絡（図 11 中、SHORT-Mes）と開放（図 11 中 OPEN-Mes）の計測値に於いて、いずれの条件でも平均的に 25dB 程度に収束している。20MHz～40MHz 近辺に見られる特性のハンプは各々分岐端の条件により共振、反共振

図 11 LCL 計測結果

Fig. 11. Measurement result of LCL

図 12 漏洩電界の計測結果（入力電圧 117dB μ V）

Fig. 12. Measurement result of radiated electric field

周波数にずれが生じている。分岐を有する計測モデルの配管に於いて LCL 計測値は 20dB 以上であった。また、計測した LCL にはバランの不均衡分も含まれるため、バランのみの LCL 特性も掲載した。（図 11 中、Balun-Mes）

〈4・2〉 漏洩電界計測結果 図 12 は漏洩電界の計測結果である。入力電圧を 117dB μ V として測定している。また、通常 EMC の評価では最大値を示すポイントを探して計測するが、計算方法の妥当性評価に用いるデータ取得のため、アンテナの配置は室内ユニットと室外ユニットの中央に固定し、配管鉛直方向の距離 3m に固定し計測を実施している。垂直偏波の電界が平均して 15dB ほど水平偏波より高い計測結果を得た。金属床表面上では、水平偏波の電界は原理的に零になるが、垂直偏波では金属の影響を全く受けない。そのため、高さ 1m の受信アンテナ周辺では、金属床の影響を受けない垂直偏波の電界が大きく現れ、上記のような計測結果が得られたものと推定できる。

5. モーメント法による計算の妥当性検討

〈5・1〉 LCL 計算モデル LCL はモーメント法ソフトウェア「NEC-WIN pro」を用いた。図 6 に示した計測モデルをモーメント法モデルに変換し、計算用のモデルを作成し

た。

図 13 は配管を用いた伝送システムの伝送系等価回路である。バランを用いた信号印加部はコモンモードインピーダンス Z_{CT} 、ディファレンシャルインピーダンス Z_{S1} , Z_{S2} と信号源で構成される。インピーダンスアッパ Z_{TS1} , Z_{TS2} は配管で構成される線路と接地 (GND) に接続される。モーメント法の計算モデルでは、信号印加部分を同図 13 示す様にディファレンシャルモードインピーダンスに等価近似し、図 14 に示す解析モデルとした。インピーダンス Z_{SC1} , Z_{SC2} を各々

$$Z_{SC1} = Z_{S1} + 2Z_{CT} \quad (1)$$

$$Z_{SC2} = Z_{S2} + 2Z_{CT} \quad (2)$$

とすると図 13 に示す線路電流 I_{C1} , I_{C2} は $I_{CM1} \approx I_{C1}$, $I_{CM2} \approx I_{C2}$ と近似できる。このように伝送系等価回路を Z_{SC1} , Z_{SC2} により単純化したモデルを構成した。

LCL は、コモンモードの信号に対するディファレンシャルモード信号への入力端における変換比なので、コモンモード入力を模擬するために、図 14 に示す 2 本のワイヤの給電点において同相で電圧を印加した。この印加された同相電圧のうち、ワイヤ上の電流は配管径の違いによる影響を受け、その位相や振幅が変化する。したがって、2 線の入力端のセグメントにおける複素電流を減算しても、完全には 0 にはならず、いくつかの成分を持つ。この電流を印加したコモンモード電流から変換されたディファレンシャルモードの電流として考え、ディファレンシャルモードインピーダンスとの積をとることにより、ディファレンシャルモード電圧 VOD を得る。

図 14 に作成した LCL の計算モデルを示す。 Z_{SC1} , Z_{SC2} の内、コモンインピーダンス分が 130Ω 、ディファレンシャルインピーダンス分が 50Ω で計 180Ω とした。ディファレンシャルインピーダンス Z_{S1} , Z_{S2} はバランのディファレンシャルインピーダンスカタログ値 100Ω を 2 分割したものである。また、コモンインピーダンス Z_{CT} はネットワークアナライザで計測した値を用いている。また Z_{TS1} , Z_{TS2} は図 4 の特性を基に算出したインピーダンスアッパに相当する RL 直列等価回路 ($R=85\Omega$, $L=0.25\mu H$) により構成した。また、受信側も同様な構成、ならびにパラメータとしている。

図 15 に信号印加部の構成を示す。送信点の電流 I_1 ならびに I_2 を計算し、(3)式により送信点の合成インピーダンスである Z_{SC1} と Z_{TS1} の並列インピーダンス $Z_1 (=Z_2)$ を各々乗算した後に複素減算して不平衡により生じるディファレンシャル電圧 VOD を計算した。また、LCL は入力電圧 VIC と VOD の比を取り、(4)式により計算した。

$$VOD = Z_1 \times I_1 - Z_2 \times I_2 \quad (3)$$

$$LCL = 20 \log (VIC / VOD) \quad (4)$$

図 16 はインピーダンスアッパのインピーダンス絶対値特性と等価回路インピーダンス計算値の比較図である。 $100\text{MHz} \sim 300\text{MHz}$ で誤差が大きくなっているが 1/10 モデルにおける DTPLC モデムの使用周波数 ($2\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$) に相当する帯域の $20\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$ での再現性を優先したパ

図 13 伝送系の等価回路と信号印加部の近似モデル
Fig. 13. Equivalent circuit diagram of the transmission line and approximate model of the input balun

図 14 LCL の計算モデル
Fig. 14. LCL calculation model

図 15 LCL 計算モデルの信号印加部における構成
Fig. 15. Detail of the transmission port

図 16 インピーダンスアッパと等価回路特性
Fig. 16. Frequency characteristic of the impedance upper and equivalent circuit

図 17 漏洩電界計算モデル

Fig. 17. calculation model of the leaked electric field

図 18 LCL 計算結果及び計測結果の比較（分岐端：開放）

Fig. 18. Calculation result of LCL (branch condition open)

ラメータを採用することとした。

図 17 は漏洩電界の計算モデルである。図 9 に示した漏洩電界計測モデルをモーメント法のモデルに変換している。信号印加点の詳細は信号電圧をディファレンシャルとしている以外は図 15 と同様である。電界の計算位置は計測モデルと同様に、配管中央から 3m の距離で、高さ 1m の地点で行った。

〈5・2〉 LCL 計算結果 LCL に関して分岐端が開放状態での計算結果と計測値を図 18 に示す。分岐端が開放条件であるため低周波域から配管径のアンバランスの影響を受け、LCL が約 40dB 程度と短絡条件に比較して低い傾向や、分岐路の共振と思われる 20MHz～70MHz 近辺に現れるピークは比較的良く再現されている。高域に行くに従い、細かな共振、反共振周波数のずれなど課題はあるが、全体的な LCL-周波数特性の傾向は比較的良く再現されている。また、分岐端が短絡状態での計算結果と計測値を図 19 に示す。分岐端が短絡条件であるため、低周波数域においては配管径のアンバランスに因り発生するディファレンシャルモード電圧は小さく、1MHz～10MHz の低周波数域において LCL が開放条件より良くなり、約 55dB から右下がりの特性を示す傾向や、高域での細かな共振、反共振周波数のずれなど課題はあるものの、10MHz 以上で発生するハンプの傾向は比較的良く再現されており、全体的な LCL-周波数特性の傾向は比較的良く再現されている。このように分岐端の条件の違いによる特性の違いの特徴などは再現されており、配管を用いた伝送システムにおいてモーメント法で LCL 計算を行うことの可能性が確認できた。

図 19 LCL 計算結果及び計測結果の比較（分岐端：短絡）

Fig. 19. Calculation result of LCL (branch condition short)

図 20 漏洩電界の計算結果

Fig. 20. Calculation result of leaked electric field

〈5・3〉 漏洩電界計算結果 図 20 に漏洩電界の計測結果と計算結果を示す。計算結果においては周波数が高くなるに従い、垂直偏波と垂直偏波の平均的なレベル差が若干大きくなる傾向があるものの、計測値と同様に垂直偏波の漏洩電界が水平偏波より平均的に見て約 15dB 程度大きくなる特徴、全体的なレベルが右上がりになる傾向などが再現されている。共振、反共振によるハンプの周波数のずれや最大で約 20dB 程度の誤差があるなど課題はあるが、全体的な特性の傾向は比較的良く再現されている。

以上のようにモーメント法を用いて、基本的な EMC 特性である線路の平衡度（LCL）ならびに漏洩電界について配管を用いた伝送システムの評価についての可能性が確認できた。次章からはモーメント法を用いた実用規模の配管システムにおける漏洩電界の評価について述べる。

6. 実用規模システムにおける EMC 特性のシミュレーション

〈6・1〉 評価対象モデムの仕様 図 21 に DTPLC 方式 (6) のモデム LSI の外観を示す。本モデム LSI は制御用途を中心に仕様が検討された HF 帯 PLC モデム LSI である。既存の無線局等との干渉を避けるためキャリア周波数を

図 21 DTPLC 方式モデムの LSI 概観

Fig. 21. View of the modem LSI of DTPLC system

表 1 DTPLC 方式モデムの LSI 仕様

Table 1. Specification of the modem LSI of DTPLC system

Item	Specification
Modulation	Dispersed-Tone multi carrier DQPSK/DBPSK
Transmission speed	400kBPS(max)
Carrier frequency [MHz]	2.56/5.12/6.4/7.68/8.96

2.56/5.12/6.4/7.68/8.96MHz に分散させたトーン分散型マルチキャリア方式を採用している。また、1 次変調方式には DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) と DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) を採用しており、1 トーンあたりの伝送速度は DQPSK 時に 80kbps、DBPSK 時に 40kbps である。各トーンに異なるデータをマッピングする Differential モードと、よりロバスト性を高くするためにすべてのトーンに同じデータをマッピングする Same モードを有し、伝送速度は最大 400kbps (Differential モード、80kbps × 5)、伝送品質に応じて 40kbps (Same モード、40kbps × 1) までフォールバック処理を自動で行う⁽⁷⁾。表 1 に DTPLC 方式モデムの LSI 仕様を示す。また、図 22 には本モデムの減衰量に対する PER の評価結果を示す。表に示すように送信出力はトーン当たり 99dB μ V (at50 Ω) としている。評価の結果、限界性能の確認はできていないが、70dB の減衰量まで許容可能である。図 5 に例示した様に、ビルに設置された空調システム配管の減衰量は 44dB 程度のため、このモデムの減衰許容性能の範囲であり、実用レベルとして十分な通信品質を得ることが可能である。以降、このモデムの出力レベル 99dB μ V を前提に漏洩電界の計算を実施することとする。

〈6・2〉 漏洩電界計算モデル 図 23 は 2 章で減衰特性を示したビルの空調配管図面を基に作成した実用規模の配管モデルである。4 階建て相当の建物に設置された空調システムを想定し、総延長 160m、各階間 5m 間隔で 40m、30m × 2、35m の分岐を持つ構成とした。また、床ならびに壁の鉄骨をアースと見なし、平面の GND プレーンから 1m の距離に配管を配置した。信号印加部の詳細を図 24 に示すが、送信端 (TX) にはモデム出力である 99dB μ V のディファレンシャル電圧を 2 分割した電圧 44.5mV を各線に印加している。また、図 25 には各分岐端の詳細を示す。図の様にインピーダンスアッパ相当のインピーダンスを直列に挿入してグラウンドプレーンに接続している。また配管の高さはグラ

図 22 減衰量－PER(パケットエラーレート)性能評価結果

Fig. 22. PER performance with transmission loss

図 23 実用規模空調配管に対する漏洩電界評価モデル

Fig. 23. Air-conditioner pipes maximum size model for evaluating the leaked electric field

図 24 信号印加部の詳細

Fig. 24. Detail of transmission port

ンドプレーンから 1m の高さとした。

計算を実施する周波数の範囲は実寸法のモデルであることを考慮し、HF 帯 PLC の信号帯域をカバーする 1MHz～30MHz とした。また、電界計算の位置は各配管からの漏洩電界が集中すると思われるモデルのほぼ中央となるメイン配管 TX 端から長手方向に 15m、高さ 11m とし、配管からの距離を 10m の位置とした。

〈6・3〉 計算結果の検討 図 26 に漏洩電界の計算結果を示す。計算は中心点から Y 方向に±1m 間隔の 3 点で実施し、その平均値をプロットしたものである。本モデルの最長分岐路が 40m であり、1/4 波長に相当する周波数は約 1.87MHz である。図 26 に示す計算結果では 1.6MHz～1.7MHz 近辺で第 1 のピークが発生しており、この発生要因が 40m の最長分岐路であると推察できる。この周波数以下では共振の発生は無いために単調なカーブ特性となり、1.6MHz 以上の周波数では他の分岐路の 1 次共振や各分岐路の高次共振によるものと思われる放射レベルの急激な変化が見られる。また、水平偏波、垂直偏波相互で大きなレベル差は見られない。

図 27 には配管の高さならびに GND 条件を変えた場合の

図 25 分岐端の詳細

Fig. 25. Detail of branch end

図 26 実用規模モデルの漏洩電界計算結果

Fig. 26. Calculation result of leaked electric field in the maximum model

垂直偏波の漏洩電界計算結果を示す。10MHz 以下では配管高さ 1m に比較して高さが増加するに従い漏洩電界レベルの増加が見られ、GND を自由空間とした条件で最大 7dB の増加が見られ、また、ピーク値では 5.6MHz で 7.5dB μ V/m であり 1m の条件に比較して約 2.5dB の増加が見られた。10MHz 以上では条件による顕著な差異は見られないが、ピークレベルとしては高さの条件を 0.5m にした場合に、12MHz 近辺で約 2.5dB の増加が見られた。

表 2 に配管組み合わせの代表例を示す。配管径の比率は 0.5～0.67 程度の範囲で組み合わせられている。図 28 は表 2 に示した配管系の比率 R が 0.5, 0.6, 0.67 について配管長 10m の各ペアに対する LCL の計算結果を示したものである。LCL の変化幅は高域になるほど大きくなっておりその差は約 3dB であった。LCL に比例し放射電界も増加すると仮定し、配管径比最大の 0.5 の場合に放射電界は 3dB 増加することが予測できる。

計算結果において電界強度の最大値は 10dB μ V/m 程度であった。モデムのキャリア周波数範囲である 10MHz 以下では最大 5dB μ V/m 程度であった。ビル用マルチエアコンや住宅用エアコンなどと同一フィールドに多く設備される機器として電気用品安全法、別表第八 2 (86 の 6) で規定される「蛍光灯」の規制値「距離 10m において 1,650kHz を超え 30MHz 以下において 25dB μ V/m」を参考値として比較した場合、20dB のマージンはある。ただし、本計算結果には〈5・3〉節に示した 1/10 モデルの計算誤差と同等の誤差の 20dB と高さ条件による 2.5dB の増加ならびに配管径比最大 0.5 での 3dB の増加を考慮すると、規定値を数 dB 超える可

図 27 配管高さ GND 条件と漏洩電界

(垂直偏波) 計算結果

Fig. 27. Calculation result of leaked Vertical electric field with pipes height and ground condition

表 2 配管組み合わせ例

Table 2. Ratio of the pipe pair

Requid pipe	Gas pipe ϕ (mm)	Requid/Gas ratio	application
6.35	9.5	0.67	room/multi air conditioner for residential
6.35	12.7	0.50	multi air conditioner for store
9.52	15.88	0.60	multi air conditioner for building
9.52	19.05	0.50	
12.7	19.05	0.67	
15.88	31.75	0.50

図 28 配管径比率-LCL 計算値

Fig. 28. Calculation result of LCL with ratio of the pipe pair

能性があり、実際にはモデムの出力調整などの対応が必要になる可能性がある。また、参考として、電波法施行規則第四十四条、第二項に記載の広帯域電力線搬送通信設備の規制値と比較検討した。この規制値は伝導妨害波の電流値としてコモンモード準尖頭値電流で規制されており $I_c = 30\text{dB } \mu\text{A}$ (at 2MHz～15MHz), $20\text{dB } \mu\text{A}$ (at 15MHz～30MHz) とされている。この値の内厳しい方の値である $I_c = 20\text{dB } \mu\text{A}$ として 10m 地点での電界に換算する。

ビオサバールの法則より $H = I_c / 2\pi R$ であるので

$$R = 10\text{m} \text{ として } H = -15.96\text{dB } \mu\text{A/m}$$

$$E = H \text{ dB } \mu\text{A/m} + 20\log 376.7\Omega \text{ より}$$

$E = 35.56\text{dB } \mu\text{V/m}$ となる。図 26 に示した計算値はピークで 10dB μ V/m であり、規制値より低い値を示した。また、LCL は $16 \pm 3\text{dB}$ として広帯域電力線搬送通信設備に於いて

規定されている。図 11 に示したように本検討の範囲では配管の LCL は 20dB 程度であった。従って、空調配管を用いた伝送システムは広帯域電力線搬送通信設備と同等の EMI 性能を実現可能であることが推察できる。

モデムの許容減衰量 70dB と比較して、図 5 に例示した様に、ビルに設置された空調システム配管の減衰量は 44dB 程度のため、出力の調整は可能であり、規定値以下に収まる可能性は十分にある。このように計算結果から配管伝送システムと HF-DTPLC モデムの組み合わせに於いて実用的な EMI 性能を保有する可能性のあることが確認できた。

7. むすび

無線ネットワークを補完する伝送媒体として空調などの金属配管を用いる配管伝送システムに対する LCL と漏洩電界を実験的理論的に検討した結果、以下の諸点が明らかになった。

(1) 導体の径がアンバランスな分岐を有する配管伝送システムの LCL 計測値は分岐端条件の開放と短絡に於いて 20dB 以上であった。分岐端が開放の線路は短絡の線路に比較して、低域において LCL が悪化する傾向を示した。

(2) LCL、漏洩電界について計測値と計算値を比較し、モーメント法による配管伝送システムの計算に対する可能性を示した。

(3) 実用規模の配管モデルについて、モデムの出力である 99dB μ V 印加時の漏洩電界を計算した結果、電気用品安全法で規定された EMI 規制値を満足する可能性のある伝送システムであることを示唆した。また、電波法施行規則第四十四条、第二項に記載の広帯域電力線搬送通信設備の規制値（コモン電流 20dB μ A）から電界強度に換算した値と比較した結果、同様に規定値以下の EMI 値となる可能性がある。

以上により、配管を用いた伝送システムが電磁環境適合性を持つ可能性がある伝送媒体であることを明らかにした。

（平成 19 年 11 月 21 日受付，平成 20 年 4 月 14 日再受付）

文 献

- (1) M. Nakata, N. kushiro, T. Higuma, and N. Hibara : “Ubiquitous Network for Building and Home control With Ad-hoc Wireless and Plug & Play mechanism”, *UbiComp2005, September*, pp.11-14 (2005)

- (2) T. Higuma, N. kushiro, M. nakata, Y. Watanabe, and M. Tokuda : “Transmission loss and radiated electric field characteristics of transmission medium for ubiquitous network” *ICCE2007 Digest of technical paper*, pp.2-6 (2007-1)
- (3) M. Tokuda : “High Speed PLC (Power Line Communication)”, *The IEICE JOURNAL Vol.88, No.3* (2005-3)
- (4) Y. Watanabe, H. Shiozawa, and M. Tokuda : “Calculation of Radiated Emissions from Power Line with Four Port Network Theory”, *IEEJ Trans. FM*, Vol.125, No.10 (2005)
- (5) 渡邊陽介・徳田正満・牧 昌弘 : 「分岐のある電力線モデルの平衡度と漏洩電界に対するモーメント法計算」, 信学技報, EMCJ, (2005-9)
- (6) H. Kubota, K. Suzuki, I. Kawakami, M. Sakugawa, and H. Kondo : “High Frequency Band Dispersed-Tone Power Line Communication Modem for Networked Appliances”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.52, No.1 (2006)
- (7) http://www.cepc.org/about_us/Events/past_events/japan_seminar/CEPCA_Seminar_Renasas.pdf
- (8) 「直膨式マルチエアコンシステム新冷媒シリーズシステム設計・工事マニュアル」, P14, MEE02W112, 三菱電機
- (9) 15th_Edition_Fair-Rite_Catalog, http://www.fair-rite.com/newfair/pdf/15th_Edition_Fair-Rite_Catalog.pdf, 2005

樋 熊 利 康

（非会員）1978 年金沢工業大学・工学・電子卒業，現在，三菱電機（株）住環境研究開発センターに在籍。主として住宅・ビル設備機器用ネットワークシステムの開発に従事。武蔵工業大学大学院工学研究科博士後期課程在学中。

渡 邊 陽 介

（学生員）2003 年武蔵工業大学電子通信工学科卒業。同年，同大学大学院工学研究科修士課程に進学。2005 年修士課程卒業。同年，博士課程に進学。現在，在学中。主に電力線搬送通信システムなど通信システムの研究に従事。

徳 田 正 満

（正員）1967 年北大・工・電子卒業。1969 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社に入社。以来，光ファイバケーブル伝送特性測定法，通信装置の EMC 等の研究に従事。1996～2001 年まで，九工大・電気・教授。現在，武蔵工業大学・電子通信工学科教授。工博。電力線搬送システムや無線通信システムなど通信システムの研究に従事。2007 年 IEEE フェロー。IEC TC77 (EMC) 国際議長。